

# 煤灰成分与灰熔融性的关联性分析

卢 财,赵俊梅,荣令坤,贾凤军,王 雄

(内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院,内蒙古 包头 014010)

**摘 要:**为研究鄂尔多斯地区煤灰成分对灰熔融性的影响,分析了煤灰总酸、总碱、酸碱比、熔融指数 FI 以及煤灰成分对灰熔融性的影响,并结合 MATLAB 软件对数据进行拟合,得出煤灰熔融温度的回归公式。结果表明,随着酸碱比增加,煤灰熔融温度逐渐升高,酸碱比大于 3.65 时,煤灰熔融温度大幅提升。依据灰熔融温度回归公式得出熔融指数 FI 最小值为 35.67%,但其预测公式并不能很好地反映 FT 增减趋势。在气化用煤中,多种矿物共同决定煤灰熔融温度。当 Si/Al<3、CaO 含量<30% 时,煤灰熔融温度较低;当 CaO 含量超过 30%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量超过 20% 时,会产生单体 CaO、FeO,其具有较高的熔融温度,煤灰熔融温度也相应升高。

**关键词:**煤灰成分;灰熔融性;酸碱比;熔融指数

中图分类号:TQ534

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2018)02-0074-05

## Correlative analysis of coal ash composition and ash fusion

LU Cai,ZHAO Junmei,RONG Lingkun,JIA Fengjun,WANG Xiong

(School of Mining and Coal Industry, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:**In order to study the influence of coal ash composition on ash fusion in Ordos,the effect of total acid,total alkalinity,acid-base ratio,melt index FI and coal ash content on ash fusion were analyzed. The regression equation of coal ash melting temperature was obtained by combining the MATLAB simulation. The results show that with the increase of acid-base ratio,the melting temperature of coal ash gradually increases,likewise,the melting temperature of coal ash increases significantly with the acid-base ratio over 3.65. According to the gray melting temperature regression formula,the minimum FI value of the melt index is 35.67%,and the prediction formula of the melt index could not reflect the trend of the FT. In gasification coal,the ash melting temperature is determined by many kinds of minerals. When the Si/Al ratio is less than 3 and the CaO content is less than 30%,the coal ash has a lower melting temperature. When the content of CaO exceeds 30% and the content of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> exceeds 20%,monomeric CaO and FeO are usually produced,while the monomer CaO and FeO have higher melting temperature,so that the melting temperature of coal ash also increases accordingly.

**Key words:**coal ash composition;ash fusion;acid-base ratio;melt index FI

## 0 引 言

鄂尔多斯是我国重要的能源基地,其煤炭储量约占全国总储量的 1/6,占内蒙古储量的 1/2。目前开发的三大煤田煤层赋存稳定、瓦斯含量少、埋藏浅、煤层厚度大、煤层多、易开发,但煤种种类较多,各地区煤质差异较大,不同煤灰其灰熔融性差异较大<sup>[1]</sup>。煤在热转化过程中矿物质转变为灰分,而煤

灰的熔融特性不仅是评价工业用煤的重要指标,也是煤灰结渣特性的重要参数,直接影响煤的气化<sup>[2-3]</sup>,目前煤气化技术的关键是气流床气化<sup>[4]</sup>。气流床气化的共同特点是采用液态排渣,这就要求锅炉的操作温度要高于流动温度(FT),若操作温度低于流动温度,会导致锅炉排渣不畅,锅炉无法正常运行<sup>[5]</sup>。同时由于鄂尔多斯地区煤种差异性较大,无法确保原料煤的流动温度满足锅炉设计参数,因

收稿日期:2017-08-26;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2018.02.014

基金项目:内蒙古自治区科技计划资助项目(201602015)

作者简介:卢 财(1992—),男,宁夏银川人,硕士研究生,研究方向为矿物加工。E-mail:372367865@qq.com

引用格式:卢财,赵俊梅,荣令坤,等.煤灰成分与灰熔融性的关联性分析[J].洁净煤技术,2018,24(2):74-78.

LU Cai,ZHAO Junmei,RONG Lingkun,et al. Correlative analysis of coal ash composition and ash fusion[J]. Clean Coal Technology,2018,24(2):74-78.

此研究灰的熔融特性对于实际生产意义重大,而煤灰成分又与煤灰的熔融特性密切相关<sup>[6]</sup>。

煤灰是一种极为复杂的物质,特别是高温下其矿物质组成和含量难以准确确定。目前先进的测试方法还未普及,因此各国学者通常把煤灰成分用  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{SO}_3$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$  表示<sup>[7]</sup>。刘新兵等<sup>[8]</sup>认为,碱金属氧化物以游离形式存在时能显著降低煤灰熔融温度,但大多数煤灰中的  $\text{K}_2\text{O}$  作为伊利石组成的一部分存在,而伊利石受热融化仍无  $\text{K}_2\text{O}$  析出,对煤灰的助熔作用显著减小。Ryo 等<sup>[9]</sup>研究土耳其褐煤的化学组成与煤灰熔融温度之间的关系时,得到的结论与 Vorres 的“离子势”论点一致,即在氧化气氛中,褐煤灰中具有明显的助熔效果,助熔成分是  $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{K}_2\text{O}$ ,其次是  $\text{CaO}$  和  $\text{MgO}$ ,从离子势的数值看, $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$  最低,其次是  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$ 。这些组分能破坏多聚物,从而表现出助熔效果。本文以鄂尔多

斯煤样为研究对象,从煤灰酸碱度、煤灰熔融指数及煤灰中化学组成含量对灰熔融特性的影响分析煤灰成分与灰熔融特性之间的关系。

## 1 试 验

### 1.1 试验煤样

分析煤样选用白家梁煤矿、炭窑渠煤矿、内蒙古伊泰宏景塔煤矿、伊东集团古城露天矿、电力满都拉煤矿、富民煤矿、恒博煤矿、神华亿德黄玉川煤矿、哈尔乌素露天煤矿、中国华电内蒙古蒙泰不连沟煤矿、东辰唐公塔煤矿。

### 1.2 煤质分析

煤的工业分析按 GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》测定,煤灰熔融性在弱还原性气氛下按 GB/T 219—2008《煤灰熔融性的测定方法》测定,煤灰成分测定按 GB/T 1574—2007《煤灰成分分析方法》,结果见表 1。

表 1 煤样煤质分析  
Table 1 Coal quality analysis

项目	白家梁	炭窑渠	伊泰集团 凯达选煤厂	聚祥集团 阳塔煤矿	伊东集团 古城露天矿	宏亚	瑞德	敖家沟西 梁煤矿	如意苏家 沟煤矿	敖劳 不拉	
工业分析/%	$M_1$	17.80	18.70	18.20	20.20	13.20	19.60	16.30	20.80	17.90	19.90
	$M_{ad}$	10.56	11.52	8.20	9.43	8.70	7.49	6.16	14.52	13.92	13.56
	$A_{ad}$	12.23	12.34	6.24	6.33	7.47	5.97	16.91	12.15	12.13	10.09
	$V_{ad}$	35.95	38.34	36.59	35.97	35.58	37.68	38.78	36.46	36.41	35.73
$w(\text{H}_{ad})/\%$	4.05	4.36	4.55	4.07	4.25	4.43	3.96	3.93	4.00	2.19	
$w(\text{S}_{t,ad})/\%$	0.34	0.20	0.21	0.18	0.15	0.32	0.30	0.61	0.52	0.25	
$Q_{net,ar}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	22.02	23.04	23.61	22.85	24.60	23.34	20.46	20.73	21.32	21.94	
灰成分含量/%	$\text{SiO}_2$	53.45	49.46	45.06	45.76	52.48	48.93	45.24	48.90	48.50	47.98
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	18.56	15.52	14.84	15.78	23.91	17.84	19.20	13.53	15.86	18.90
	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	6.92	10.68	14.16	12.12	5.47	15.20	11.86	11.22	11.52	11.00
	$\text{CaO}$	9.22	9.86	11.49	12.32	11.62	9.73	14.56	10.55	11.28	10.70
	$\text{MgO}$	1.69	1.98	2.42	2.51	1.15	2.73	3.12	2.51	2.34	2.62
	$\text{K}_2\text{O}$	1.70	1.32	0.80	0.61	0.16	1.00	1.32	1.64	1.59	1.44
	$\text{Na}_2\text{O}$	0.45	0.53	0.64	0.74	0.34	1.04	0.42	0.81	0.40	0.57
	$\text{TiO}_2$	1.00	0.86	0.82	0.81	0.72	1.06	0.79	0.86	0.76	0.97
$\text{SO}_3$	3.70	4.31	5.93	5.71	4.89	2.62	3.56	6.85	8.31	4.12	
灰熔融性/°C	DT	1 180	1 110	1 130	1 120	1 250	1 100	1 190	1 120	1 140	1 130
	ST	1 210	1 140	1 140	1 140	1 270	1 120	1 220	1 130	1 160	1 150
	HT	1 230	1 190	1 160	1 180	1 290	1 150	1 230	1 160	1 180	1 180
	FT	1 250	1 220	1 170	1 200	1 340	1 180	1 240	1 200	1 200	1 200

## 2 酸碱比对灰熔融性的影响

由于煤种不同,煤质差异较大,使得煤灰组分差异较大,而煤灰的总酸、总碱以及酸碱比都是煤灰各

成分计算所得,因此煤灰之间总酸、总碱以及酸碱比也存在差异。煤灰的酸碱比值  $S$  是指煤灰中的酸性氧化物与碱性氧化物的质量比,公式<sup>[10]</sup>为

$$S = [m(\text{SiO}_2) + m(\text{Al}_2\text{O}_3) + m(\text{TiO}_2)] /$$

$$\frac{m(\text{Fe}_2\text{O}_3) + m(\text{CaO}) + m(\text{MgO}) + m(\text{K}_2\text{O}) + m(\text{Na}_2\text{O})}{m(\text{SiO}_2) + m(\text{Al}_2\text{O}_3) + m(\text{TiO}_2)} \quad (1)$$

式中,  $m(i)$  为各物质的质量, g。  
煤灰酸碱结果见表 2。

表 2 煤灰酸碱结果

Table 2 Analyses of acid-base in coal ash

项目	白家梁	炭窑渠	伊泰集团 凯达选煤厂	聚祥集团 阳塔煤矿	伊东集团 古城露天矿	宏亚	瑞德	敖家沟西 梁煤矿	如意苏家 沟煤矿	敖劳 不拉
总酸含量/%	73.01	65.84	60.72	62.35	77.11	67.83	65.23	63.06	65.12	67.85
总碱含量/%	19.98	24.14	29.51	28.30	18.74	26.70	34.27	26.73	26.81	26.33
酸碱比	3.65	2.73	2.06	2.20	4.11	2.54	1.90	2.36	2.43	2.57

## 2.1 总酸和总碱的影响

煤灰熔融温度主要取决于灰成分中各元素组成及含量, 一般情况下, 煤灰中酸性氧化物 ( $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ ) 含量越高, 越易形成多聚物, 导致灰熔融温度较高; 而碱性氧化物 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ ) 含量高, 能使多聚物解离, 灰熔融温度降低<sup>[11-12]</sup>。总酸、总碱含量与 FT 关系如图 1 所示。

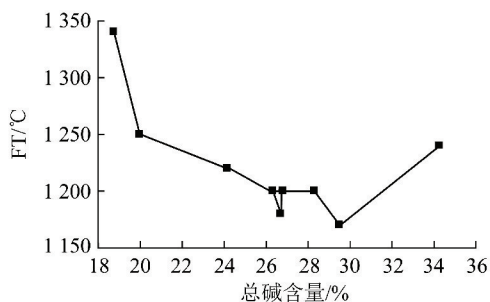
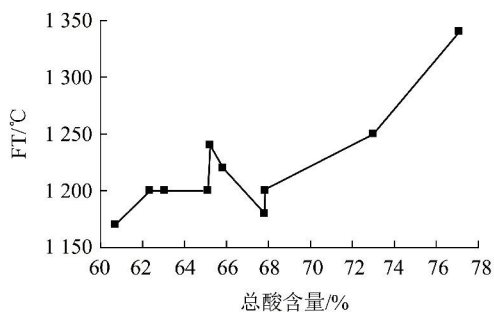


图 1 总酸、总碱含量与 FT 关系

Fig. 1 Relationship among total acid, total alkalinity and FT

由图 1 可知, 总酸含量在 60.72% ~ 65.23% 与 67.83% ~ 77.11% 时, FT 逐渐升高; 总酸含量在 65.23% ~ 67.83% 时, FT 逐渐降低。总碱含量在 18.74% ~ 26.70% 与 28.30% ~ 29.51% 时, FT 逐渐下降; 总碱含量在 26.70% ~ 26.73% 与 29.51% ~ 34.27% 时, FT 逐渐升高。因此, 煤灰的 FT 总体随总酸含量的增加而增加, 这是因为总酸含量中的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  熔点超过 1 500 °C; 由于总酸含量的

增加, 总碱含量减少, 碱性氧化物抑制酸性氧化物形成多聚物的效果越来越差, 故随着总酸含量的增加, 煤灰的 FT 也相应升高。随着总碱含量的增加, 煤灰的 FT 呈现先降低后升高的趋势, 这是因为随着碱性氧化物的增加, 对于酸性氧化物形成多聚物的抑制效果更加突出, 但碱性氧化物  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  的熔点也超过 1 500 °C, 碱性氧化物含量过高, 不仅不会起到降低煤灰熔融温度的作用, 相反会使得煤灰的熔融温度升高。

## 2.2 酸碱比的影响

酸碱比与 FT 的关系如图 2 所示。由图 2 可知, 酸碱比在 1.90 ~ 2.06 与 2.43 ~ 2.54 时, FT 下降; 酸碱比在 2.06 ~ 2.43 与 2.54 ~ 4.11 时, FT 上升。酸碱比小于 3.65 时, FT 波动幅度不大, 维持在 1 170 ~ 1 250 °C。分析图 2 可知, 随着酸碱比增加, 煤灰的 FT 也逐渐升高, 这是因为酸性氧化物增多, 碱性氧化物减少, 而酸性氧化物自身熔点较高, 因此随着酸碱比增加, 煤灰的 FT 相应升高。酸碱比大于 3.65 时, 随着酸碱比的增加, 煤灰的 FT 大幅提升。

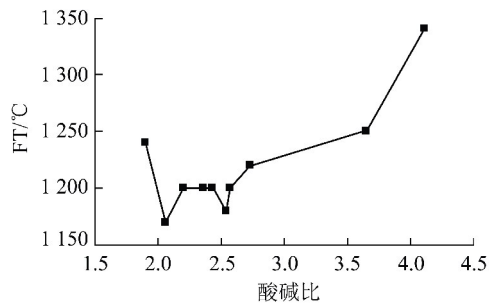


图 2 酸碱比与 FT 关系

Fig. 2 Relationship between acid-base ratio and FT

## 3 熔融指数对灰熔融性的影响

国内学者在讨论煤灰化学成分与煤灰熔融性关系时, 提出用熔融指数 FI 预测煤灰熔融温度的回归

公式<sup>[13]</sup>,FI表示为

$$FI = w(\text{SO}_3) + w(\text{Fe}_2\text{O}_3) + w(\text{CaO}) + w(\text{MgO}) + w(\text{K}_2\text{O}) + w(\text{Na}_2\text{O}) \quad (2)$$

式中, $w(i)$ 为各物质的质量分数,%。

回归公式运用二次函数表示,即

$$f(\text{FI}) = a\text{FI}^2 + b\text{FI} + c \quad (3)$$

式中, $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为参数。

通过 MATLAB 软件对数据进行曲线拟合,计算出  $a$ 、 $b$ 、 $c$ ,得到煤灰熔融温度的回归公式为

$$f(\text{FI}) = 0.017 \text{FI}^2 - 1.21\text{FI} + 1\,239 \quad (4)$$

FI 散点图及曲线拟合如图 3 所示。

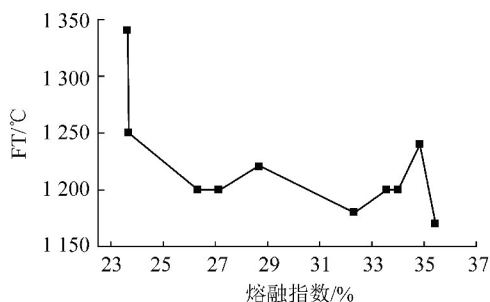


图 3 FI 散点图及曲线拟合

Fig. 3 Scatter plot and curve fitting of FI

将 FI 带入  $f(\text{FI})$  中,得到预测  $\text{FT}=1\,218\text{ }^\circ\text{C}$ ,实测  $\text{FT}=1\,220\text{ }^\circ\text{C}$ ,预测值与实测值相差  $2\text{ }^\circ\text{C}$ ,满足国家标准。预测式(4)为开口向上的抛物线函数,可以计算出当  $\text{FI}=35.67\%$  时, $f(\text{FI})$  有最小值  $1\,203\text{ }^\circ\text{C}$ 。

由于曲线拟合较差,且熔融指数回归公式只考虑煤灰酸性组分中的  $\text{SO}_3$ ,未考虑另外 2 种酸性组分  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,而这 2 种酸性组分在煤灰组分中占比较大,对煤灰熔融流动温度有很大影响;熔融指数回归公式为开口向上的抛物线,最小值为  $35.67\%$ ,因此  $\text{FI}<35.67\%$  时,FT 理论上随着 FI 的增加而减小,但实际生产中无法出现  $\text{FI}=35.67\%$  的情况,造成 FT 实测值与预测值之间的差值超限,熔融指数预测公式无法准确预测煤灰的熔融流动温度。

煤灰熔融温度的回归公式仅可在一定条件下指导实际生产,锅炉设计参数一定时,依据回归公式,求得 FI,通过添加助溶剂或阻溶剂以及改变配煤方式,可使气化用煤满足锅炉设计参数,提高锅炉使用寿命<sup>[14-16]</sup>。

#### 4 煤灰成分对灰熔融性的影响

李文等<sup>[7]</sup>研究表明,煤灰中的硅铝比、碱金属含量都会影响煤灰的熔融温度。由于煤灰是一种极

为复杂的物质,煤气化过程中,多种矿物共同决定煤灰的熔融温度。当  $1<\text{Si}/\text{Al}<3$ 、CaO 含量小于  $30\%$  时,煤灰的流动温度一般较低,这是由于 CaO 易与  $\text{SiO}_2$  作用形成熔点较低的硅酸盐,当 CaO 含量大于  $30\%$  时,会生成 CaO 单体,单体 CaO 熔点较高,无法降低灰熔融温度<sup>[17-18]</sup>。

鄂尔多斯地区煤灰中  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量一般在  $20\%$  以内,在弱还原气氛下, $\text{Fe}_2\text{O}_3$  以 FeO 形态存在,与其他价态铁相比,FeO 易与  $\text{SiO}_2$  等物质作用形成低熔点共融化合物,降低煤灰的流动温度; $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量超过  $20\%$  时,由于生成 FeO 单体,而 FeO 单体是一种熔点很高的氧化物,使煤灰熔融温度升高<sup>[19]</sup>。

MgO 含量一般在  $3\%$  以内,当 MgO 以  $\text{Mg}^{2+}$  形式存在时,煤灰的低聚物增多,可降低灰熔融温度<sup>[20]</sup>。 $\text{K}_2\text{O}$  与  $\text{Na}_2\text{O}$  含量较 MgO 少,可降低灰熔融温度,但煤灰中  $\text{K}_2\text{O}$  是作为伊利石的一部分存在,并没有以  $\text{K}^+$  形式存在,所以  $\text{K}_2\text{O}$  降低灰熔融温度效果不明显<sup>[21-22]</sup>。

#### 5 结 论

1) 由煤灰中总酸、总碱以及酸碱比与 FT 的关系可知,总酸含量升高,FT 增高,这是由于酸性氧化物中  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  的熔点超过  $1\,500\text{ }^\circ\text{C}$ ;总碱含量升高,FT 先降低后升高,这是由于随着碱性氧化物增加,对于酸性氧化物形成多聚物的抑制效果突出,但碱性氧化物  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、CaO、MgO 的熔点也超过  $1\,500\text{ }^\circ\text{C}$ ,因此碱性氧化物含量过高,会使煤灰熔融温度升高。

2) 煤灰熔融指数预测公式能预测煤灰熔融温度,但由于熔融指数回归公式未考虑  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  两种酸性组分,且实际生产中,很难出现  $\text{FI}=35.67\%$  情况,造成 FT 实测值与预测值的差值超限,熔融指数预测公式并不能很好反映 FT 增减趋势。

3) 气化用煤过程中,煤灰各成分之间共同作用于煤灰熔融温度。一般情况下,当  $\text{Si}/\text{Al}<3$ ,CaO 含量小于  $30\%$  时,煤灰熔融温度较低, $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量在  $20\%$  以内能起到降低灰熔融温度的作用。当 CaO 含量超过  $30\%$  以及  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量超过  $20\%$  时,通常会生产单体 CaO、FeO,而单体 CaO、FeO 具有较高的熔融温度,使熔融温度呈上升趋势。

#### 参考文献 (References):

- [1] 马克富,屈志国,隋艳,等.鄂尔多斯市原煤的煤质特性及工业适用性分析[J].煤质技术,2017(2):8-11.

- MA Kefu, QU Zhiguo, SUI Yan, et al. Analysis on coal quality characteristics and industrial applicability of raw coal from ordos [J]. Coal Quality Technology, 2017(2):8-11.
- [2] 程相龙,王永刚,张荣,等. 低温共熔物对煤灰熔融温度影响的研究[J]. 燃料化学学报, 2016, 44(9):1043-1050.
- CHENG Xianglong, WANG Yonggang, ZHANG Rong, et al. Effect of low temperature eutectics on coal ash fusion temperatures[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2016, 44(9):1043-1050.
- [3] 樊泉桂,潘攀. 化学组分及单组分熔融温度与煤灰熔融温度的相关性分析[J]. 锅炉技术, 2007(6):10-13, 19.
- FAN Quanguai, PAN Pan. The correlativity on shan chemistry component melting temperature and coal ash melting temperature[J]. Boiler Technology, 2007(6):10-13, 19.
- [4] 褚晓亮,苗阳,付玉玲,等. 气流床气化技术在我国的应用现状及发展前景[J]. 化工技术与开发, 2013, 42(12):31-34.
- CHU Xiaoliang, MIAO Yang, FU Yuling, et al. Present situation and development of air-bed gasification technology in China[J]. Chemical & Development of Technology, 2013, 42(12):31-34.
- [5] 王艳柳,张晓慧. 煤灰熔融性对气化用煤的影响[J]. 煤质技术, 2009(4):55-58.
- WANG Yanliu, ZHANG Xiaohui. Effect of ash fusibility on gasifying coal[J]. Coal Quality Technology, 2009(4):55-58.
- [6] 刘硕,周安宁,杨伏生,等. 煤灰流动温度的预测研究[J]. 煤炭与化工, 2017, 40(3):20-24.
- LIU Shuo, ZHOU Anning, YANG Fusheng, et al. Study on prediction of coal ash flow temperature[J]. Coal and Chemical Industry, 2017, 40(3):20-24.
- [7] 李文,白进. 煤的灰化学[M]. 北京:科学出版社, 2013:83-87.
- [8] 刘新兵,陈莹. 煤灰熔融性的研究[J]. 煤化工, 1995, 23(2):48-52.
- [9] RYO Y, MAKOTO N, HIROSHI M. Influence of ash composition on heavy metal emissions in ash meltings process[J]. Fuel, 2002, 81(10):1335-1340.
- [10] 李平,梁钦锋,刘霞,等. 酸碱比值与助熔剂对煤灰熔融流动温度影响的研究[J]. 大氮肥, 2010, 33(2):107-111.
- LI Ping, LIANG Qinfeng, LIU Xia, et al. Study of effect on fusion flow temperature of coal-ash by pH ratio and flux [J]. Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry, 2010, 33(2):107-111.
- [11] 关瑞,祁亚萍. 煤灰成分对西湾煤灰熔融特征的影响[J]. 陕西煤炭, 2016, 35(5):101-102.
- GUAN Rui, QI Yaping. The influence of the coal ash composition to the coal ash melting characteristics[J]. Shaanxi Coal, 2016, 35(5):101-102.
- [12] 张雷. 煤灰化学组成与煤灰熔融温度关系的探讨[J]. 中国新技术新产品, 2014(5):25-27.
- ZHANG Lei. Discussion on the relationship between coal ash chemical composition and coal ash melting temperature[J]. New Technologies and Products, 2014(5):25-27.
- [13] 袁宝泉,陶秀祥,蒋松. 府谷煤灰成分对其灰熔融性的影响试验研究[J]. 中国煤炭, 2013, 39(5):80-84.
- YUAN Baoquan, TAO Xiuxiang, JIANG Song. Research on the influence of coal ash fusibility by Fugu coal ash composition[J]. China Coal, 2013, 39(5):80-84.
- [14] 马乐波,杨磊,夏支文. 煤灰成分对灰熔融特性影响的多角度分析[J]. 中氮肥, 2014(6):58-61.
- MA Lebo, YANG Lei, XIA Zhiwen. Multi-angle analysis of the influence of coal ash composition on ash melting property [J]. M-sized Nitrogenous Fertilizer Progress, 2014(6):58-61.
- [15] 刘家利. 准东煤灰熔融性与灰成分相关性分析[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(5):99-102.
- LIU Jiali. Correlation analysis of ash fusibility and ash composition of Zhudong coal[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(5):99-102.
- [16] 郭延红,伏瑜,张科鑫. 配煤降低陕北煤灰熔点研究[J]. 中国煤炭, 2017, 43(1):94-98.
- GUO Yanhong, FU Yu, ZHANG Kexin. Study of blending to reduce ash fusion temperayure of Shanxi coal [J]. China Coal, 2017, 43(1):94-98.
- [17] 袁海平,梁钦锋,刘海峰,等. CaCO<sub>3</sub> 对煤灰熔融特性和黏温特性影响的研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20):49-55.
- YUAN Haiping, LIANG Qinfeng, LIU Haifeng, et al. Effects of CaCO<sub>3</sub> on the fusion characteristic and viscosity-temperature behaviour of coal ashes [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20):49-55.
- [18] 孟莹,董众兵,李寒旭,等. 硅铝比对煤灰热膨胀性的影响[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(3):112-115.
- MENG Ying, DONG Zhongbin, LI Hanxu, et al. Influence of Si/Al ratio to thermal expansion of coal ash [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(3):112-115.
- [19] 胡晓飞,郭庆华,刘霞,等. 高钙高铁煤灰熔融及黏温特性研究[J]. 燃料化学学报, 2016, 44(7):769-776.
- HU Xiaofei, GUO Qinghua, LIU Xia, et al. Ash fusion and viscosity behavior of coal ash with high content of Fe and Ca [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2016, 44(7):769-776.
- [20] 高峰,马永静. Mg<sup>2+</sup> 和 Na<sup>+</sup> 对高熔点煤灰熔融性的影响[J]. 燃料化学学报, 2012, 40(10):1161-1166.
- GAO Feng, MA Yongjing. Study on the effect of Mg<sup>2+</sup> and Na<sup>+</sup> on the fusibility of coal ash with high ash fusion point [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2012, 40(10):1161-1166.
- [21] 刘勇晶,郭延红,刘胜华. 煤灰成分对煤灰熔融特性的影响[J]. 煤炭转化, 2013, 36(1):68-71.
- LIU Yongjing, GUO Yanhong, LIU Shenghua. Influence of coal ash content on the melting characteristics of coal ash [J]. Coal Conversion, 2013, 36(1):68-71.
- [22] 杨鑫,黄戒介,赵建涛,等. 褐煤配入高熔点煤灰的灰熔点预测模型研究[J]. 化学工程, 2012, 40(10):80-84.
- YANG Xin, HUANG Jiejie, ZHAO Jiantao, et al. Ash fusion temperature prediction model of lignite blending high melting point coal ash [J]. Chemical Engineering, 2012, 40(10):80-84.